



PIOTR PAWEŁKO

NAPĘD I STEROWANIE HYDRAULICZNE
PODSTAWY
ĆWICZENIA LABORATORYJNE

Sterowanie proporcjonalne

Materiały przeznaczone są dla studentów Wydziału Inżynierii Mechanicznej i
Mechatroniki

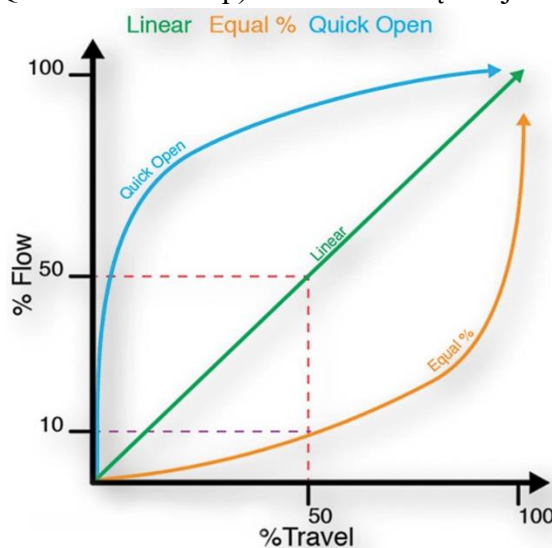
kopiowanie, powielanie, rozpowszechnianie bez wiedzy autora zabronione

SZCZECIN 2021

1. Technika proporcjonalna

Obecnie w układach hydraulicznych sterowanie podstawowymi funkcjami (start, zmiana kierunku i zatrzymanie ruchu odbiornika, tj. silnika lub siłownika) odbywa się za pomocą zaworów elektromagnetycznych. Cewki tych zaworów, zasilanych napięciem o różnej wartości, dają tylko dwa położenia: otwarte i zamknięte (dwustanowe, zero-jedynkowe).

Niestety dla wielu zastosowań, np. rozpędzania i hamowania dużych mas (bezwładności), sterowanie dwustanowe jest niewystarczające. W celu rozwiązania tego problemu już w latach 70-tych, wprowadzono do konstrukcji elektrozaworów specjalny elektromagnes, którego zwora zajmuje położenie pośrednie między skrajnymi położeniami, stosownie do sygnału elektrycznego – uzyskuje się wówczas położenie proporcjonalne uzależnione od sygnału sterującego. Elektromagnes proporcjonalny jest istotnym elementem, który decydował o powstaniu i rozwoju techniki sterowania proporcjonalnego. Podstawową cechą tego typu sterowania jest utrzymywanie proporcjonalności między elektrycznym sygnałem wejściowym o małej mocy zasilającym elektromagnes proporcjonalny, a hydraulicznym sygnałem wyjściowym zaworu (natężeniem przepływu Q lub ciśnieniem p) o znacznie większej mocy.



Rys.1. Rodzaje charakterystyk zaworu (% otwarcia, % przepływu)

Wyróżniamy następujące grupy elektrozaworów:

- zawory proporcjonalne sterowania ciśnienia;
- zawory proporcjonalne regulacji przepływu (strumienia);
- zawory proporcjonalne kombinowane, łączące funkcje sterowania kierunkiem i przepływem.

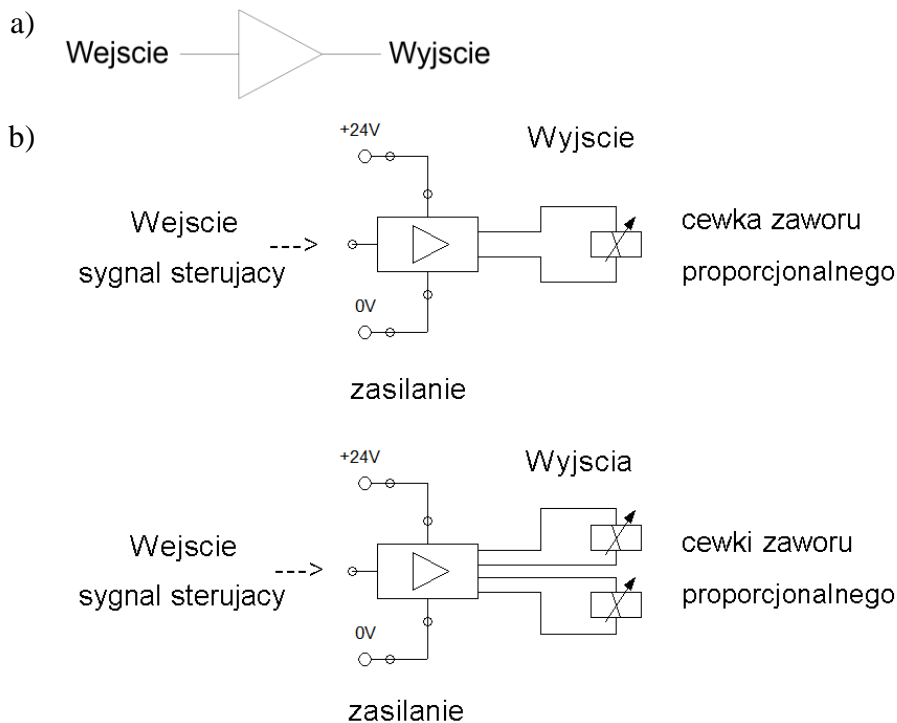
Jeśli wymagana jest większa dokładność pracy zaworu, stosowane są dodatkowe czujniki położenia, informujące zwrotnie o rzeczywistym (uzyskanym) położeniu suwaka. Sygnał sterujący, wysyłany na cewkę elektromagnesu proporcjonalnego, podawany jest **ze wzmacniacza (elektronicznej karty sterującej)**. Istnieją również wersje zaworów z tzw. zintegrowaną elektroniką, czyli wzmacniaczem zabudowanym bezpośrednio na zaworze proporcjonalnym.

Celem działania układu sterowania jest kształtowanie sygnału wyjściowego zgodnie z programem określonym przez sygnał zadany. Sygnał zadany może być wprowadzany przez:

- człowieka,
- urządzenie pomiarowe informujące o zaistnieniu pewnego szczególnego stanu układu,
- urządzenie zmieniające ten sygnał według założonego programu w czasie,
- zewnętrzny wzmacniacz / generator sygnału

2. Wzmacniacz sygnału

Wzmacniacz sygnałów elektrycznych to rodzaj wzmacniacza, którego zadaniem jest wytworzenie na wyjściu wzmocnionego wejściowego sygnału elektrycznego (sterującego), kosztem energii pobieranej ze źródła zasilania.



Rys.2. Wzmacniacz sygnału a) schemat elektryczny, b) schematy funkcjonalne wzmacniacza proporcjonalnego jedno i dwukanałowego w układach sterowania pneumatycznego i hydraulicznego

Stosując zawory proporcjonalne, możemy w cyklu automatycznym regulować ciśnienie (siłę lub moment układu mechanicznego) lub przepływ (prędkość układu mechanicznego - liniową lub obrotową).

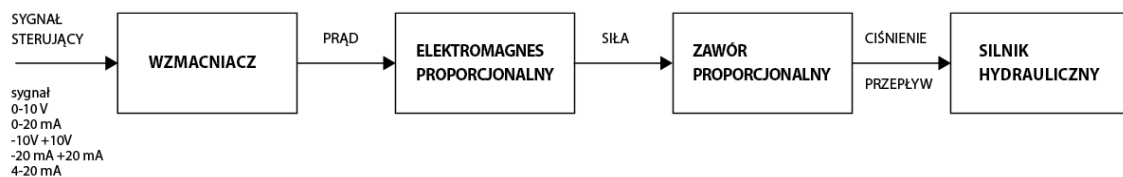
PROBLEM: *Przemieszczanie dużych mas wiąże się z siłami bezwładności, zastosowanie rozdzielaczy proporcjonalnych pozwala na wyhamowanie i łagodny rozruch mas bezwładnych, dzięki temu hydraulika proporcjonalna zapewnia bezpieczeństwo, zabezpieczając przed uszkodzeniem konstrukcji, zapewnia także stateczność w urządzeniach przeładunkowych oraz wydłuża żywotność części mechanicznej – zmniejsza obciążenia dynamiczne.*

3. Zawory proporcjonalne

Zawory proporcjonalne mogą pracować w dwóch typach układów sterowania: otwartym i zamkniętym.

3.1 Układ otwarty – układ bez sprzężenia zwrotnego

Układ otwarty (ang. open-loop system) – to układ automatyki, w którym sygnał wyjściowy zależy tylko od wartości sygnału wejściowego. W układzie nie występuje sprzężenie zwrotne, uwzględniające wewnętrzny stan obiektu. Przebieg sygnału następuje tylko w jednym kierunku, od wejścia do wyjścia.



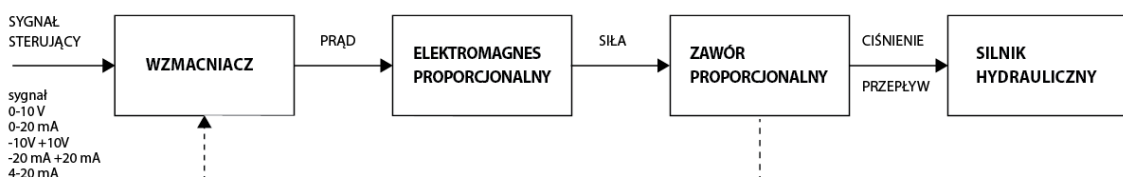
Rys.3. Układ otwarty – schemat blokowy

Przykład: Poniżej przykład zaworu USAB6 (firmy Ponar) pracującego w układzie otwartym; karta 30RE20D jest wzmacniaczem, który zamienia sygnały wejściowe, o wartościach standardowych (-20mA+20 mA, ±10V) na prąd zasilający elektromagnes.



3.2 Układ zamknięty – układ ze sprzężeniem zwrotnym

Układ zamknięty (ang. closed-loop system) – układ sterowania, w którym występuje pętla sprzężenia zwrotnego. Sygnał wyjściowy jest mierzony i w przypadku wystąpienia różnicy między wartością zadaną a zrealizowaną przez zawór następuje automatyczna korekta. Od wejścia do wyjścia (tor główny) przebiega sygnał realizujący wzajemne oddziaływanie elementów, natomiast od wyjścia do wejścia (tor sprzężenia zwrotnego) przebiega sygnał sprzężenia zwrotnego.



Rys.4. Układ zamknięty – schemat blokowy

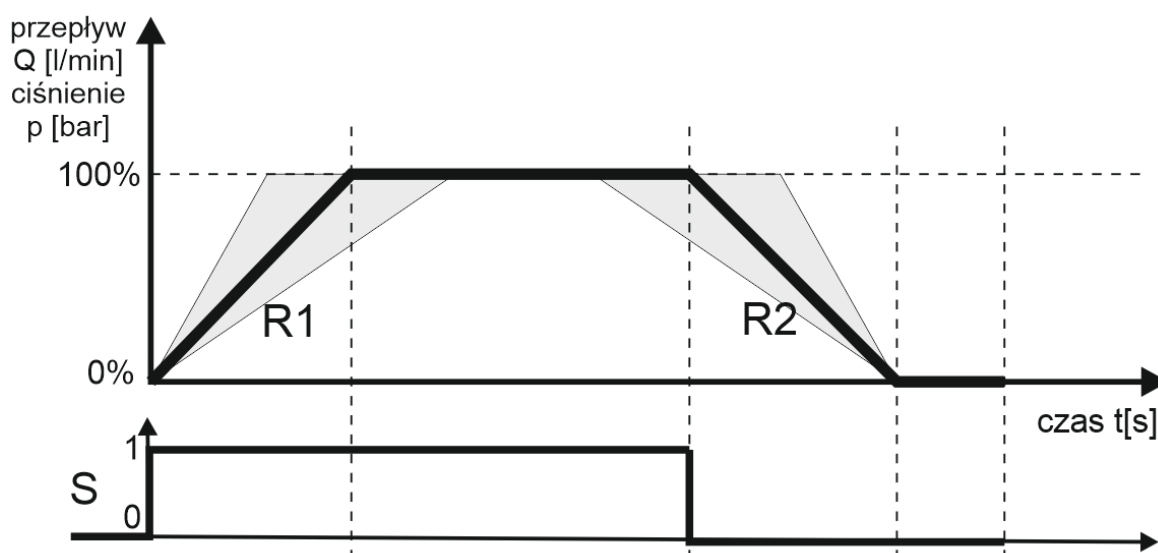
Przykład: Poniżej przykład zaworu USEB6 (firmy Ponar) pracującego w układzie zamkniętym; karta 30RE21D jest wzmacniaczem, który zamienia sygnały wejściowe, standardowe (4-20 mA, $\pm 10V$) na prąd zasilający elektromagnes, posiada także regulator PID, który reaguje na sygnał zwrotny położenia suwaka ze sprzężenia zwrotnego. Karta ECI9D-01, jest elementem sprzężenia zwrotnego, zamienia sygnał z czujnika położenia suwaka rozdzielacza (czujnik pomiaru przemieszczenia suwaka jest zabudowany do rozdzielacza) na sygnały standardowe 4-20 mA, $\pm 10V$.



Porównując te dwa układy sterowania, sterownie w układzie zamkniętym jest układem droższym, ponieważ musi być zrealizowane sprzężenie zwrotne. Dzięki temu układ zamknięty cechuje się histerezą poniżej 1%, w porównaniu do układu otwartego, gdzie uzyskujemy histerezę 6%; powtarzalność wartości zadanych też poniżej 1% dla układu zamkniętego, dla układu otwartego, uzyskujemy powtarzalność 3%.

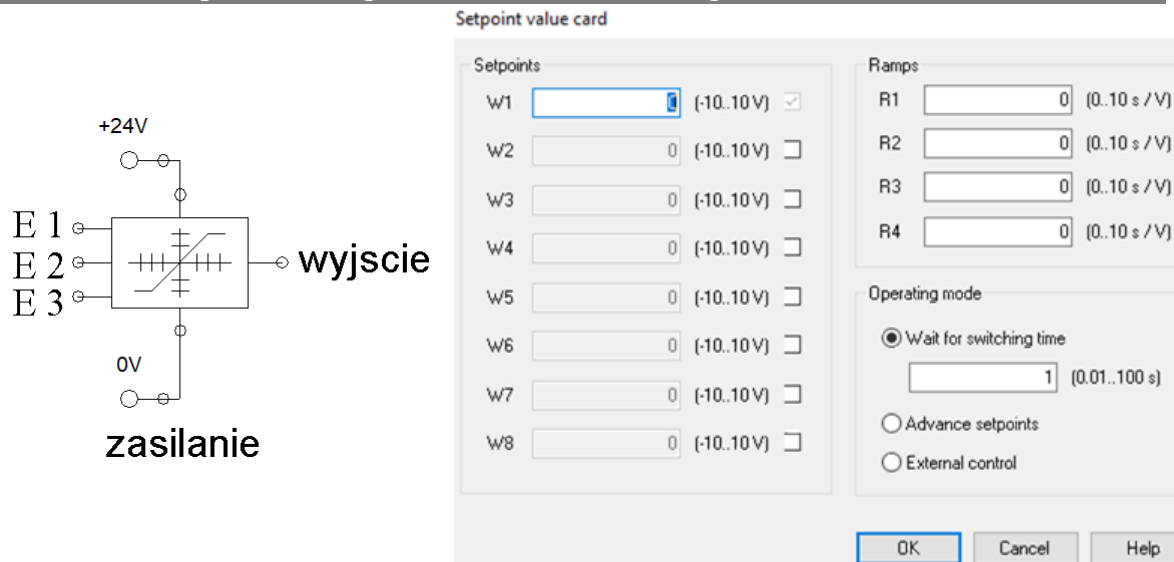
3.3 Kształtowanie sygnału zadanego – rampa

Istnieje wiele możliwości sterowania sygnałem elektronicznym; jednym z nich jest tzw. funkcja rampy. W oprogramowaniu Festo dostępny jest element „Setpoint Value Card” – Karta sterująca.



Rys. 5. Przebieg dwustanowego sygnału zadanego (S) i formowanie sygnału przez kartę sterującą

W oprogramowaniu Festo FluidSIM-H dostępny jest element Setpoint Value Card do kształtowania przebiegu sygnału sterowania.



Rys. 6. Symbol oraz okno ustawień modułu Setpoint Value Card w aplikacji Festo FluidSIM-H

Za pomocą elementu można tworzyć niezależne profile napięciowe, do 8 wartości zadanych **W1** do **W8** w zakresie napięć od -10 V do +10 V. Można też użyć tylko jednej wartości – domyślnej. Układ wymaga zasilania 24 V.

Zmiana wartości sygnału od aktualnej do następnej wartości zadanej jest definiowany za pomocą 4 ramp **R1** do **R4** o wartościach od 0 s/V do 10 s/V. Pozostawienie wartości 0 pomija nastawy ramp i nie wpływa na zmianę przebiegu sygnału. Niska wartość rampy oznacza szybkie osiągnięcie sygnału zadanego, podczas gdy duża wartość rampy skutkuje powolnym wzrostem jego wartości. Rampa jest współczynnikiem R [s/V], przez który mnoży się wartości sygnału zadanego S [V]. Wynikiem jest czas t [s] wymagany do osiągnięcia wartości zadanej sygnału (opóźnienie).

Aktywna rampa (wartość różna od 0) jest zdefiniowana w następujący sposób:

- **R1** narastanie wartości sygnału S1 (zbocze narastające),
- **R2** zmniejszanie wartości sygnału S1 (zbocze opadające),
- **R3** narastanie wartości sygnału S2 (zbocze narastające),
- **R4** zmniejszanie wartości sygnału S2 (zbocze opadające).

gdzie: S1 i S2 – to sygnały wysyłane na dwie cewki zaworu proporcjonalnego

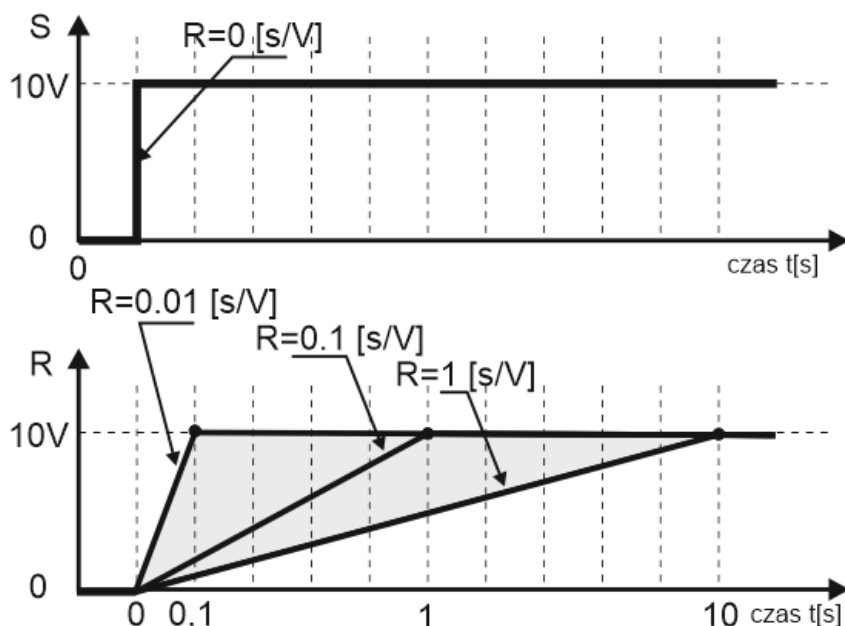
Przykład: dla sygnału zadanego S zmieniającego się skokowo z 0 na 10V:

- dla wartości rampy $R = 0$ [s/V] na wyjściu uzyskamy sygnał tożsamy z zadaniem, czyli natychmiast 10V ($t=0$ [s])

- dla wartości rampy $R = 0,01$ [s/V] na wyjściu uzyskamy sygnał 10V po upływie czasu $10 \times 0,01 = 0,1$ s ($t=0,1$ [s])

- dla wartości rampy $R = 0,1$ [s/V] na wyjściu uzyskamy sygnał 10V po upływie czasu $10 \times 0,1 = 1$ s ($t=1$ [s])

- dla wartości rampy $R = 1$ [s/V] na wyjściu uzyskamy sygnał 10V po upływie czasu $10 \times 1 = 10$ s ($t=10$ [s])



Rys. 7. Wykresy: przebieg sygnału zadanego S oraz sygnału sterowania po zastosowaniu współczynnika ramy R o różnych wartościach

W aplikacji Festo FluidSIM-H można wybrać trzy tryby pracy (Operating mode) karty sygnałowej „Setpoint Value Card”:

- **Wait for switching time** - Oczekuj na czas przełączania, wówczas wartości zadane są zmieniane sekwencyjnie po **upływie ustawionego czasu** zmiany [s],
- **Advance setpoints** - Zaawansowane wartości zadane. Po uzyskaniu przez wartość zadaną poziomu docelowej wartości [w zakresie -10..10V] – bez znaczenia od ustawień ramy, następuje automatyczne przejście do następnej wartości,
- **External control** - Sterowanie zewnętrzne, gdzie wybór aktywnej wartości zadanej następuje przez bramkowanie wejść (External) E1, E2 i E3 napięciem **co najmniej 15 V**. Odpowiednia wartość zadana jest wybierana za pomocą określonej tabeli bitów. Podczas tego procesu wewnętrzny czas przełączania jest nieaktywny.

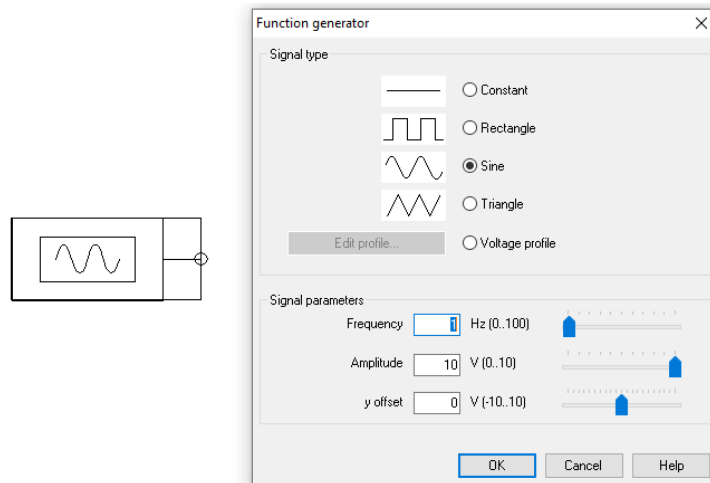
	E1	E2	E3
W1	0	0	0
W2	1	0	0
W3	0	1	0
W4	1	1	0
W5	0	0	1
W6	1	0	1
W7	0	1	1
W8	1	1	1

3.4 Kształtowanie przebiegu sygnału zadanego

Sygnał sterujący może pochodzić z układu wykonawczego z sensorów lub też z generatora sygnału/funkcji (Function generator). Generator sygnału jest źródłem napięcia, które może tworzyć sygnały stałe, prostokątne, sinusoidalne i trójkątne. Zakres napięcia jest w zakresie -10 V do +10 V. W tym zakresie można ustawić częstotliwość, amplitudę i przesunięcie y (tzw. y offset) sygnału.

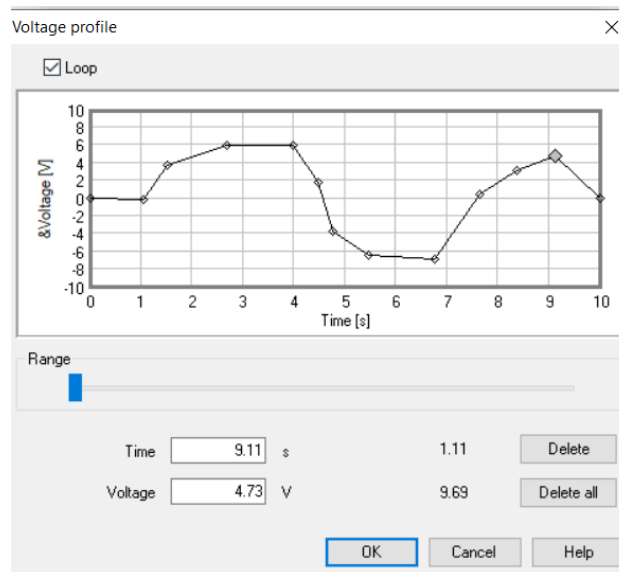
Regulowane parametry i ich zakresy:

- Częstotliwość: 0...100 Hz
- Amplituda: 0...10 V
- Przesunięcie y: -10 ... 10 V

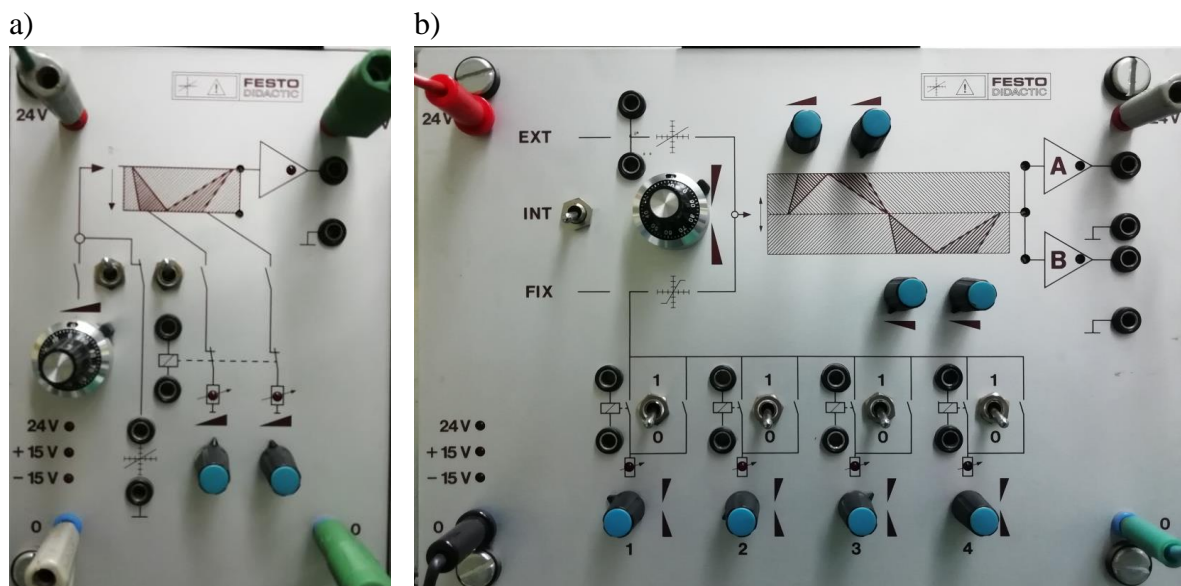


Rys.8. Okno generatora sygnału w aplikacji Festo FluidSIM-H

Dodatkowo można określić profil napięcia (Voltage profile). Punkty danych można ustawić interaktywnie za pomocą wskazania ich w odpowiednim polu graficznym. W przypadku wybrania opcji „pętla” (ang. Loop) profil napięciowy jest uruchamiany ponownie.



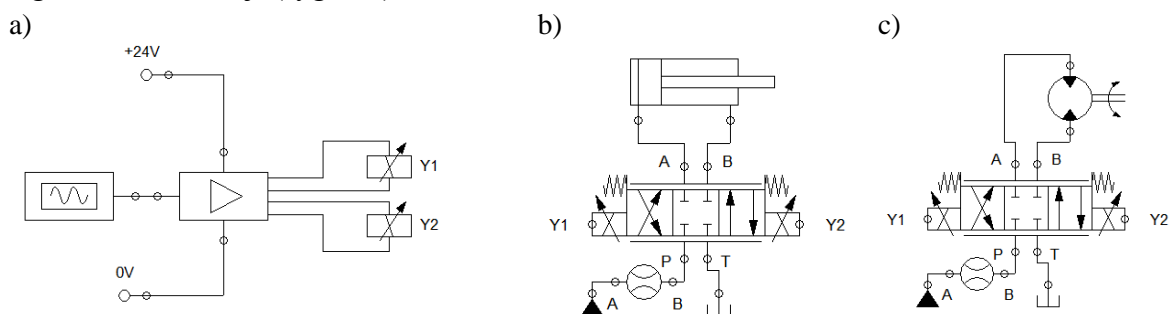
Rys.9. Okno generatora sygnału „Voltage profile” w aplikacji Festo FluidSIM-H



Rys. 10. Moduł sterownika proporcjonalnego stanowiska FESTO z:

a) pojedynczym wzmacniaczem i kartą sygnałową, b) podwójnym wzmacniaczem i kartą sygnałową

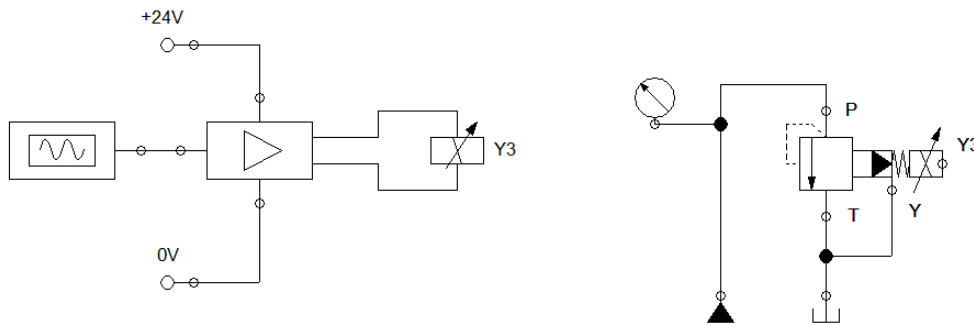
Na rysunku 11 przedstawiono schematy układu elektrohydraulicznego sterowania z zastosowaniem zaworu proporcjonalnego przepływu (prop. Q). Sterowanie prędkością liniową siłownika dwustronnego działania przedstawiono na schemacie rys.11 b lub silnikiem hydraulicznym na schemacie rys.11 c. Sterowanie elektryczne w obu układach realizowane jest w ten sam sposób rys.11 a. Wzmacniacza proporcjonalny dwukanałowy zasila cewki Y1 i Y2 zaworu proporcjonalnego. Sygnał sterowania podawany jest na układ z generatora funkcji (sygnału).



Rys. 11 Elektrohydrauliczny układ sterowania z zastosowaniem zaworu proporcjonalnego przepływu

a) schemat układu zadawania sygnału, b) sterowanie siłownikiem dwustronnego działania, c) sterowanie silnikiem hydraulicznym

Na rysunku 12 przedstawiono schemat układu elektrohydraulicznego sterowania z zastosowaniem zaworu proporcjonalnego ciśnienia (prop. p). Sterowanie wartością ciśnienia (potencjalnej siły w siłowniku, momentu obrotowego w silniku) przedstawiono na schemacie rys.11. Wzmacniacza proporcjonalny jednokanałowy zasila cewkę proporcjonalną Y3 zaworu proporcjonalnego. Sygnał sterowania podawany jest na układ z generatora funkcji (sygnału). Aktualną wartość nastawionego ciśnienia można odczytywać z manometru zainstalowanego w układzie.



Rys. 12 Elektrohydrauliczny układ sterowania z zastosowaniem zaworu proporcjonalnego ciśnienia

Przebieg ćwiczenia

- a) Korzystając z oprogramowania komputerowego do projektowania układów elektrohydraulicznych zamodelować układy (rys. 11 i 112, przeanalizować działanie układów, zrealizować diagram pracy układu,

Przećwiczyć sterowanie generatorem sygnału w 5-ciu możliwych wyborach

- - sygnały stały
- - sygnał prostokątny
- - sygnał sinusoidalny
- - sygnał trójkątny
- - profil napięcia

Dane wg. wskazań prowadzącego z zakresów:

- Częstotliwość: 0...100 Hz
- Amplituda: 0...10 V
- Przesunięcie y: -10 ... 10 V

Zanotuj spostrzeżenia z symulacji, zwracając uwagę czy zawór otworzy się w pełni i jaki będzie przebieg pracy elementu wykonawczego (prędkość, przemieszczenie).

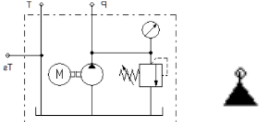
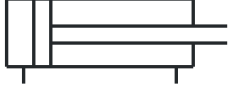

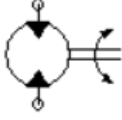

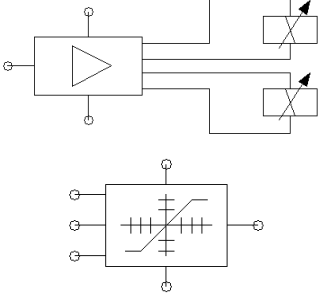
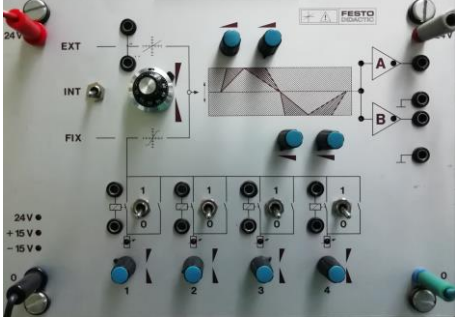
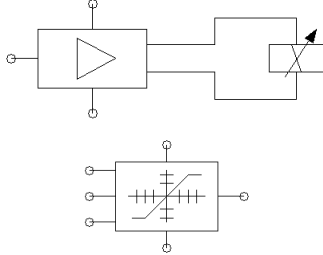
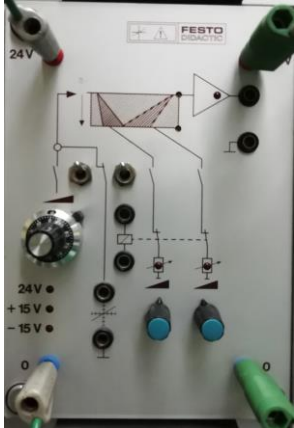
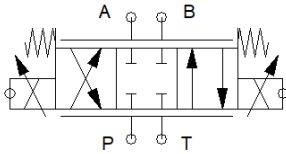

- b) Połączyć na stanowisku laboratoryjnym układ wg. wykonanego schematu – wskazany przez prowadzącego (rys.10 lub 11), sprawdzić działanie układu,

Użyć tych samych nastaw co w symulacji komputerowej

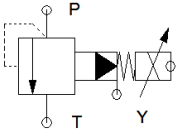



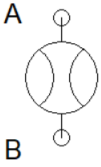

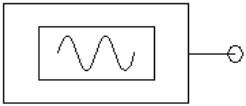

Porównać działanie układów z danymi uzyskanymi w symulacjach.

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki

Elementy wykorzystane w ćwiczeniu

<p>Zasilacz hydrauliczny / Źródło zasilania hydraulicznego</p>		<p style="text-align: center;">stanowisko</p>
<p>siłownik dwustronnego działania</p>		
<p>Silnik hydrauliczny</p>		
<p>Panel sterowania z dwoma wzmacniaczami operacyjnymi i kartą sygnałową</p>		
<p>Panel sterowania z jednym wzmacniaczem operacyjnym i kartą sygnałową</p>		
<p>zawór rozdzielający 4/3 proporcjonalny sterowany za pomocą dwóch cewek, monstabilny</p>		

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki

<p style="text-align: center;">zawór proporcjonalny ciśnienia</p>		
<p style="text-align: center;">Manometr / optyczny wskaźnik ciśnienia</p>		
<p style="text-align: center;">przepływomierz</p>		
<p style="text-align: center;">Generator sygnału</p>		

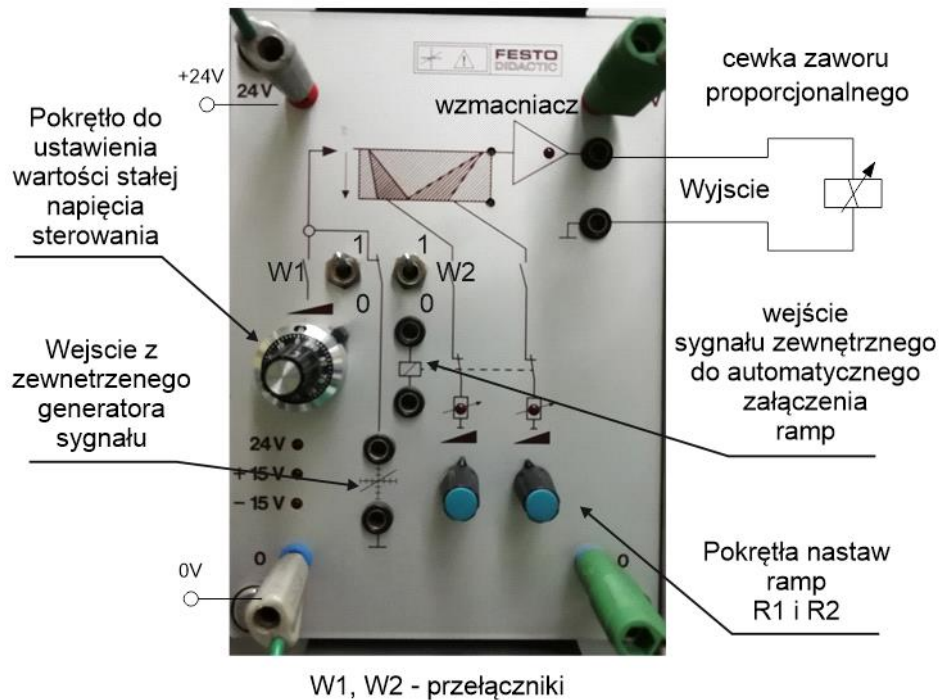
Literatura:

Andrzej Pizoń, Elektrohydrauliczne analogowe i cyfrowe układy automatyki, WNT Warszawa 1995

Ponar - <https://www.ponar-wadowice.pl/technika-proporcjonalna>

Eaton Vickers - <https://eatonvickers.pl/rozdzielaczeHydrauliczne.html>

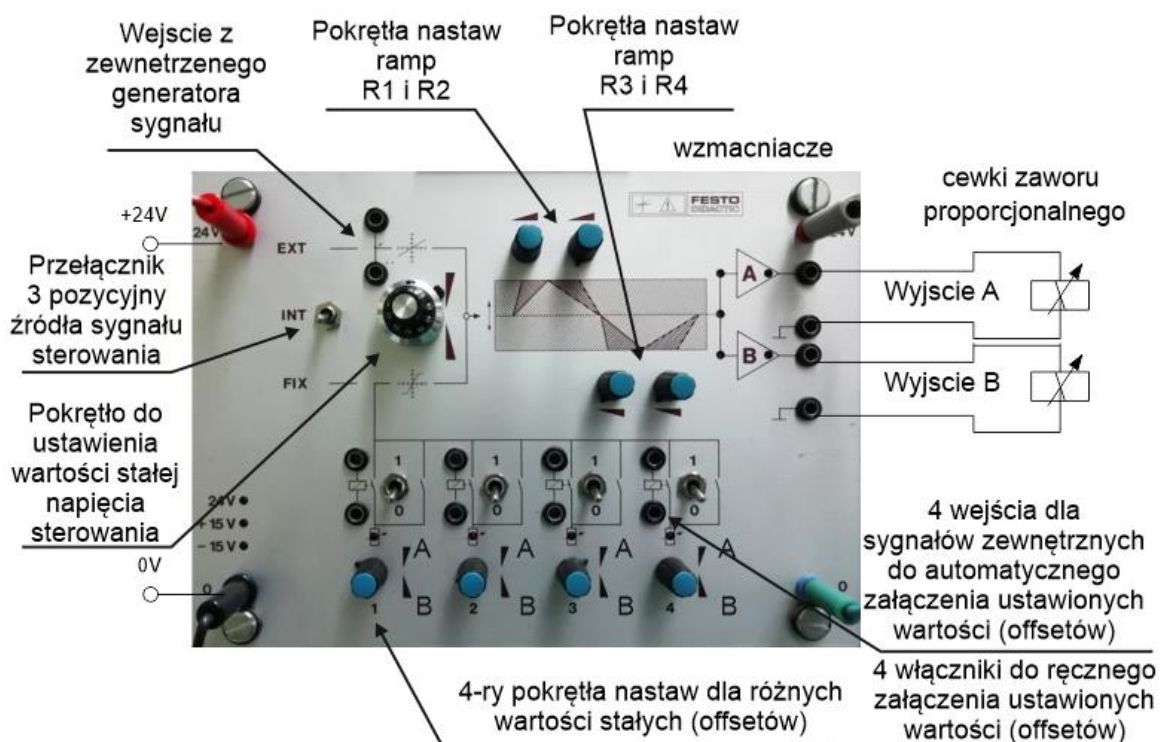
Panel sterowania proporcjonalnego z jednym wzmacniaczem



Ustawienie przełączników W1 W2

Nr	Stan W1	Stan W2	
I	0	0	Sygnał z generatora, bez ramp
II	0	1	Sygnał modyfikowany nastawionymi rampami R1 R2
III	1	1	Tylko ustawienie wartości stałe pokrętkiem – offset y

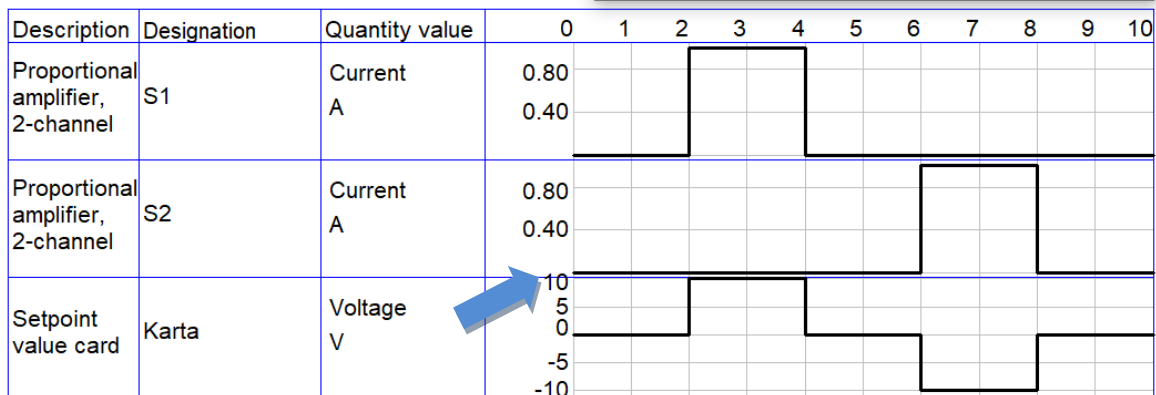
Panel sterowania z dwoma wzmacniaczami



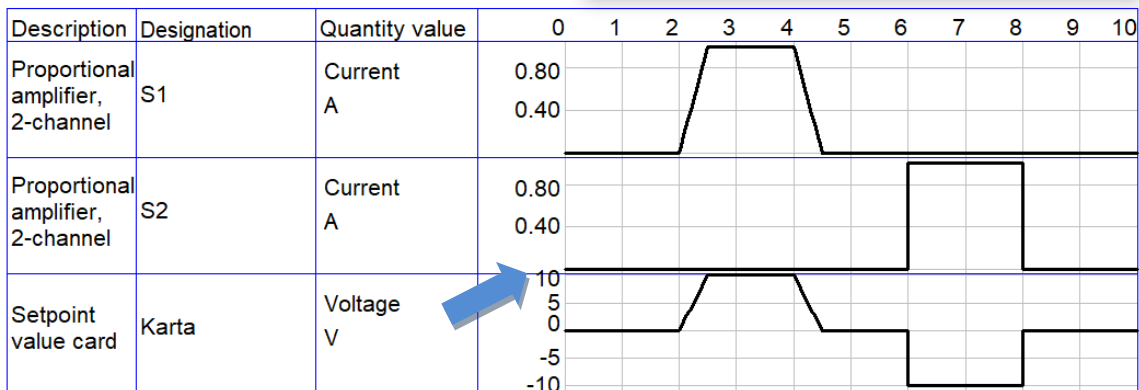
Nastawy wartości Ramp – przykłady

Przebieg sygnału (Setpoints): wartości W:0,10,0,-10,0 V, zmiana co 2s

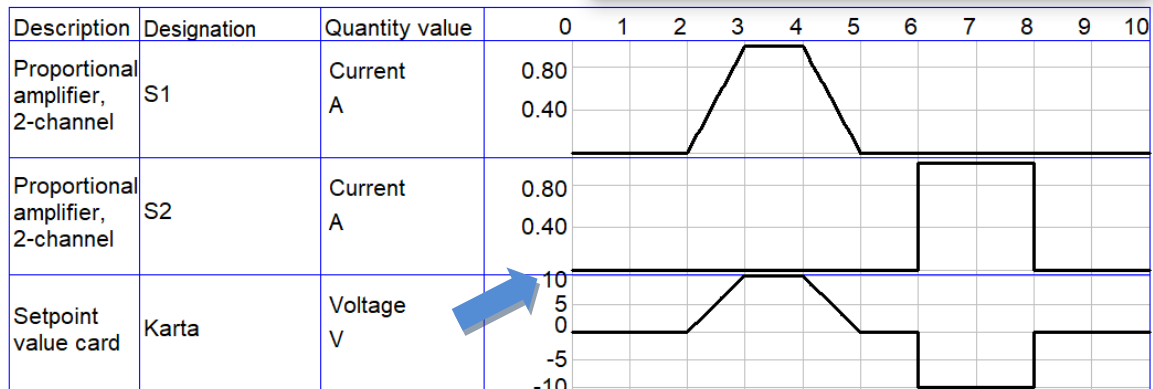
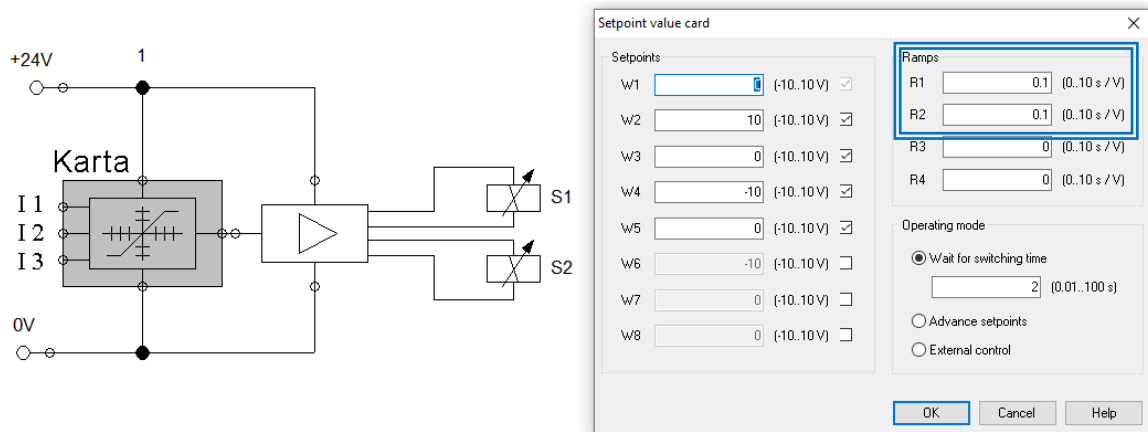
a) Rampy **R1 i R2 = 0 [s/V]**, R3 i R4 = 0 [s/V]



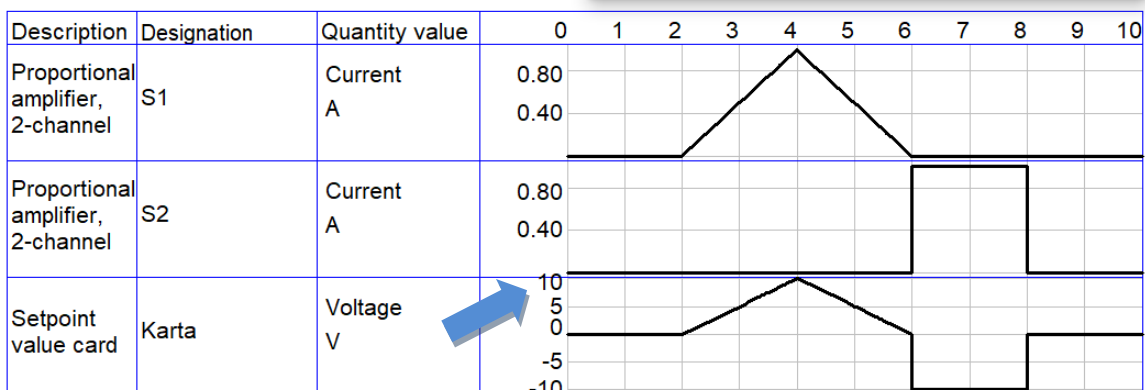
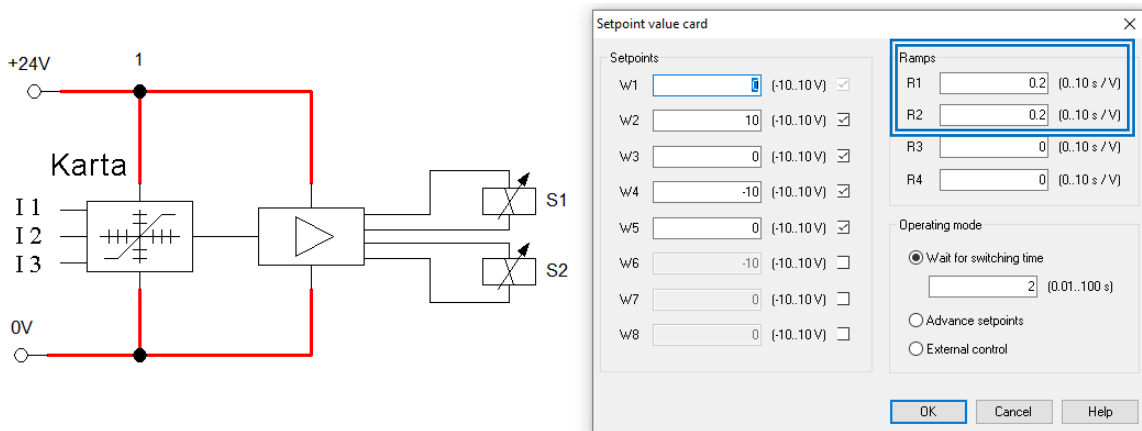
b) Rampy **R1 i R2 = 0.05 [s/V]**, R3 i R4 = 0 [s/V]



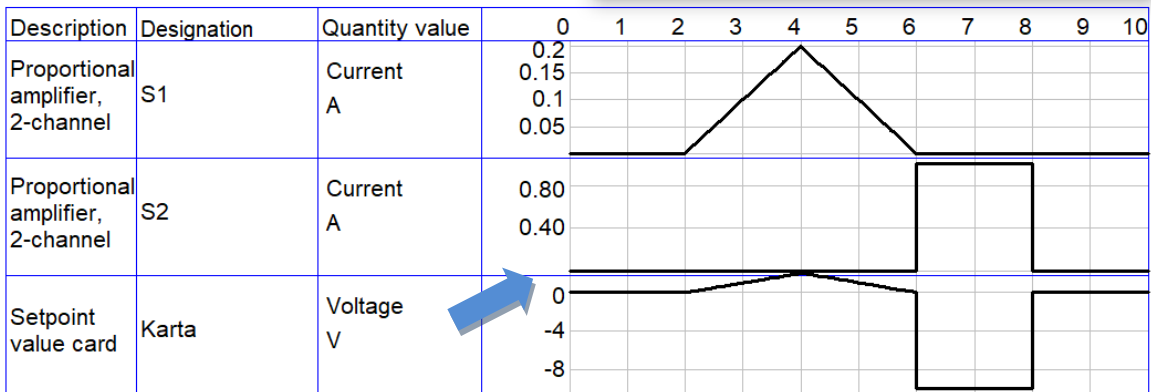
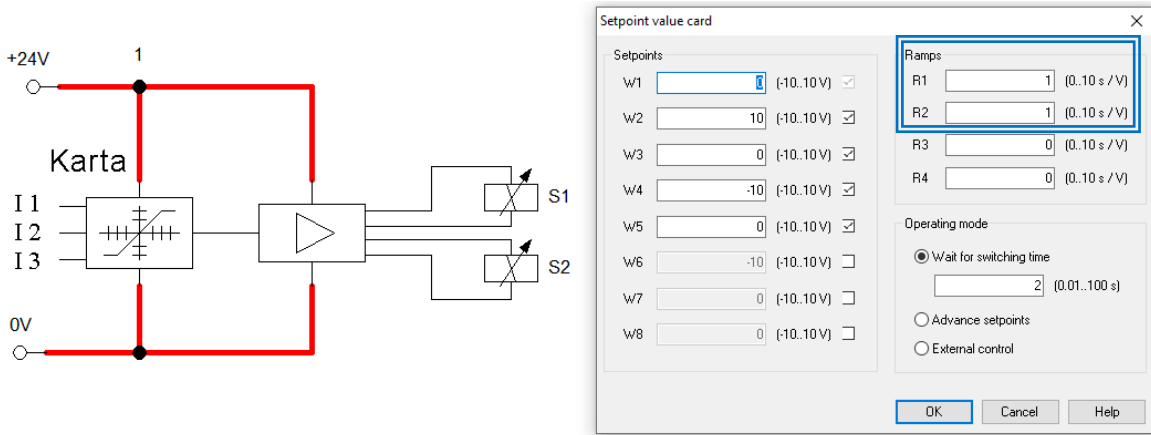
c) Rampy $R1$ i $R2 = 0.1$ [s/V], $R3$ i $R4 = 0$ [s/V]



d) Rampy $R1$ i $R2 = 0.2$ [s/V], $R3$ i $R4 = 0$ [s/V]



e) Rampy $R1$ i $R2 = 1$ [s/V], $R3$ i $R4 = 0$ [s/V]



f) Rampy $R1$ i $R2 = 2$ [s/V], $R3$ i $R4 = 0$ [s/V]

